

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18360009

研究課題名(和文)：室温強磁性窒化物半導体ナノ構造とナノスピントロニクスデバイス応用に関する研究

研究課題名(英文) Study on Room Temperature Ferromagnetic Nitride Semiconductor Nanostructures and Nanospintronics Device Application

研究代表者：朝日 一 (ASAHI HAJIME)

大阪大学・産業科学研究所・教授

研究者番号：90192947

研究成果の概要：

- (1) GaGdN/GaN 超格子構造を成長し、キャリア誘起磁性による磁化の向上を観測した。
- (2) 室温強磁性を示す GaCrN ナノロッド構造の成長を実現した。
- (3) GaGdN を低温成長することにより、Gd 濃度の増加とそれに伴う飽和磁化の大幅な増大を実現した。Si の同時ドーピングにより更なる飽和磁化の増大が可能であることを示した。
- (4) Alフラックスを減少させて成長することにより、ヘテロ界面が平坦でAlドロップレットのない良好なGaCrN/AlN多重量子ディスク (MQDisk) ナノロッド構造の成長に成功した。
- (5) GaCrN/AlN/GaCrN 三層構造ダイオードを作製し、77Kにおいてトンネル磁気抵抗(TMR)効果を観測した。全半導体ベースのTMRデバイスでは最高の温度でのTMR効果の観測である。
- (6) AlNの代わりにAlGaInに置換えたGaCrN/AlGaIn-MQW構造とすることによっても平坦なヘテロ界面を持つ良好なMQW構造が成長可能なことが分かった。この知見に基づき、AlGaInGaCrN/AlGaIn三層構造磁気トンネルデバイスを試作した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2007年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2008年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
総計	15,300,000	4,590,000	19,890,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用物性・結晶工学

キーワード：スピントロニクス，半導体物性，MBE，ナノ材料，結晶工学

1. 研究開始当初の背景

半導体と磁性体の物性を1つの物質で発現させ、それを用いて半導体スピントロニクスデバイスを創製し、次世代の高度情報化社会で要求される超高集積化・超高速化・不揮発性・超省エネルギー化や量子情

報処理・量子計算などを実現しようとの研究は日本を含め多くの研究機関で研究が進められている。しかし、その多くは GaAs, InAs の III-V 族半導体に遷移金属 Mn を添加した希薄磁性半導体 GaMnAs, InMnAs で研究されているが、これらの希薄磁性半

導体の強磁性キュリー温度は遥かに室温以下であり、実用デバイスとはなりえない。このため室温以上で強磁性を示す希薄磁性半導体の創製が求められていたが、我々は GaN に Cr を添加することにより良好な室温強磁性を見出した [1]。さらに、強い発光特性を示すという従来の希薄磁性半導体では観測されていなかった特性も実現した [2]。その後、希土類添加 GaN においても室温強磁性を観測し [3]、これら我々の報告に誘発されて、各所で Cr 添加、希土類添加の窒化物半導体の研究が活発化している。

最近酸化物半導体ならびに II-VI 族半導体ベースの希薄磁性半導体 (ZnCoO, TiCoO₂, ZnCrTe) でも室温強磁性が観測され盛んに研究されているが、これらの強磁性半導体では発光特性は観測されていない。また、多くのデバイス技術の確立された Si あるいは III-V 族半導体ベースでないため、従来デバイスとの整合性には課題があると考えられる。

本研究は、従来技術との整合性が良い希薄磁性半導体を対象とし、世界を先導する形で進められてきた研究を新規なナノスピントロニクスデバイス創製へと一層推進させる研究と位置づけられる

[1] M. Hashimoto, Y.K. Zhou, M. Kanamura and H. Asahi, "High temperature (> 400K) ferromagnetism in III-V-based diluted magnetic semiconductor GaCrN grown by ECR molecular beam epitaxy", Solid State Com. 122 (2002) 37-39.

[2] M. Hashimoto, H. Tanaka, R. Asano, S. Hasegawa and H. Asahi, "Observation of photoluminescence emission in ferromagnetic semiconductor GaCrN", Appl. Phys. Lett. 84 (2004) 4191-4193.

[3] N. Teraguchi, A. Suzuki, Y. Nanishi, Y.K. Zhou, M. Hashimoto and H. Asahi, "Room-temperature observation of ferromagnetism in diluted magnetic semiconductor GaGdN grown by RF-molecular beam epitaxy", Solid State Com. 122 (2002) 651-653.

2. 研究の目的

申請者らが初めて成長・実現した室温透明発光強磁性の遷移金属および希土類原子を添加した GaN ベース希薄磁性半導体を基に、それらのナノ構造を作製し、強磁性特性への効果の把握、ナノ構造と磁化特性との関係の明確化、新規物性・特性探索を行い、高性能磁性半導体を創製するとともに新規な半導体ナノスピントロニクスデバイスのプロトタイプの新規・試作を行うことである。

具体的には、(1) デルタドーピングによる Cr, Gd の添加した GaN、(2) GaCrN/GaN, GaGdN/GaN の強磁性半導体層と非磁性半導体層からなる超格子構造 (3) 量子井戸構造、量子細線構造、量子ドット構造などの量子ナノ構造の作製を行い、磁化特性への効果ならびに新規物性・特性を明らかとし、(4) 新規な半導体スピントロニクスデバイスの創製を行うことである。

3. 研究の方法

まず、遷移金属、希土類原子添加 GaN 強磁性半導体の特性向上、新規物性・特性探索の観点から、磁性原子のデルタドーピング構造、強磁性半導体層と非磁性半導体層からなる超格子構造、量子井戸構造の作製と評価について検討を行う。

(1) 実効的に磁性原子濃度を増加させ、磁性原子間の相互作用を強くする方法として、デルタドーピングによる Cr, Gd の添加を試みる。

(2) GaCrN (GaGdN) と GaN のような強磁性半導体層と非磁性半導体層からなる超格子構造について検討を行う。

(3) 量子井戸構造の作製を行い、特に新規物性・特性の探索の観点から、検討を行う。

続いて、ナノ構造として量子細線構造、量子ドット構造とすることによる磁化特性への効果を明らかとする。

(4) GaCrN, GaGdN 量子細線構造を作製し、磁化特性、電気特性、発光特性評価、断面 SPM 観察、XAFS 評価を行う。その結果を基に、希薄磁性半導体 GaCrN, GaGdN 量子細線の特徴、物性・特性の把握を行う。

(5) GaCrN, GaGdN 量子ドット構造を作製し、磁化特性、電気特性、発光特性評価、断面 SPM 観察、XAFS 評価を行う。その結果を基に、希薄磁性半導体 GaCrN, GaGdN 量子ドットの特徴、物性・特性の把握を行う。

(6) これまでの研究成果に基づき、最適条件での GaCrN/AlN/GaCrN の 3 層構造の成長を行う。

(7) 成長した GaCrN/AlGaIn/GaCrN 3 層構造サンプルを用いて、トンネル磁気抵抗効果デバイスを作製し、トンネル磁気抵抗 (TMR) 比を確認する。

4. 研究成果

(18年度)

(1) プラズマ励起 MBE 法により遷移金属添加の強磁性半導体 GaCrN/AlN 多重量子井戸構造を作製するために、GaCrN の成長温度 700°C において Al の表面偏析のない平坦

な AlN 層成長の条件を把握した。この結果に基づき、多重量子井戸構造を作製し、X線回折により数次に亘るサテライトピークの観測より多重量子井戸構造が形成されていることが確認された。SIMS においては、GaCrN 井戸層内の表面側に Cr 濃度が高くなっていることが分かった。また、量子閉じ込めによるブルーシフトしたフォトルミネッセンス発光が観測された。さらに、室温で強磁性が観測され、AlN 障壁層が薄いものでより強い磁化が現れることを見出した

(2) 希土類添加強磁性半導体 GaGdN と非磁性半導体 GaN からなる超格子構造を作成に、磁化特性の各層厚さの依存性を調べた結果、相対的に GaN 層が厚い超格子で大きな磁化が観測された (図 1)。非磁性層 GaN 層からのキャリア流入によるキャリア誘起磁性が発現しているものと考えられる。

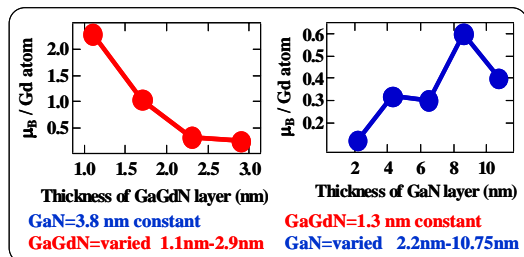


図 1 GaGdN/GaN 超格子でのキャリア誘起による磁気モーメントの増大。

(3) GaCrN/AlN/GaCrN 三層構造ダイオードを作製し、77K においてダイオードの抵抗と磁場の関係にトンネル磁気抵抗 (TMR) 効果に特徴的なヒステリシスカーブが観測された (図 2)。この結果は全半導体ベースの TMR デバイスでは最高の温度での TMR 効果の観測である。

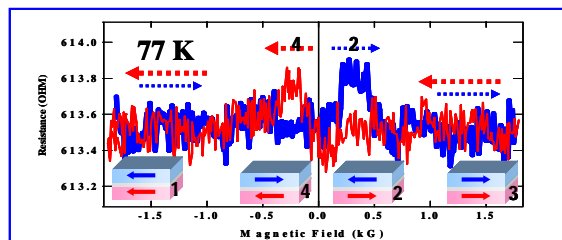


図 2 GaCrN/AlN 三層構造トンネルダイオードにおけるトンネル磁気抵抗効果の観測。

(19年度)

(1) GaCrN ナノロッドを、プラズマ励起 MBE 法により SiO₂ 自然酸化膜付きの Si(001) 基板上に 700°C で成長した GaN ナノロッドの上に Cr フラックスを同時供給することにより成長した。成長温度 700°C で

高 Cr 濃度の時には、反強磁性 CrN が析出した。基板温度を 550°C に低下させて成長を行なうことにより CrN の析出のない GaCrN ナノロッドが形成されることが分かった (図 3)。低温成長された GaCrN ナノロッドは、室温強磁性を示すことが確認された。

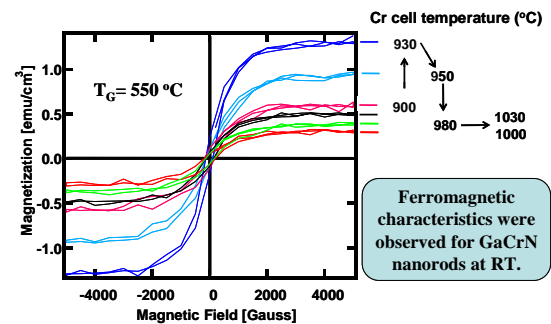
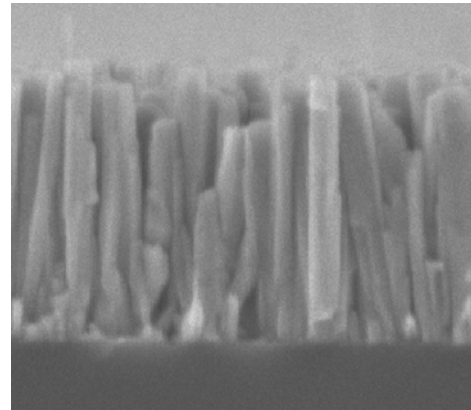


図 3 GaCrN ナノロッドの形成と磁化特性。

(2) XAFS (X 線吸収微細構造) 測定により GaCrN の原子配置の評価を行なった。比較的高基板温度ならびに高 Cr 濃度を目指した試料では、CrN の相分離が見られるが、低 Cr 濃度もしくは低基板温度で成長した試料では全く相分離が見られない。すなわち、GaCrN は準安定状態にあることが分かった。また、添加原子である Cr がテトラヒドロンのセンターからずれていることを示唆された。強磁性発現に大きく影響を与えていると考えられる。

(3) 300°C の低温成長により 2 次相のない Gd 濃度 13% の GaGdN 強磁性半導体の成長が可能となることを明らかとした。これにより飽和磁化の大幅な増大を確認した (図 4 a)。また、Si の同時ドーピングにより更なる飽和磁化の増大を観測した (図 4 b)。XAFS 測定により低温成長 GaGdN では磁性不純物 Gd は Ga サイトを置換していることを明らかとした。

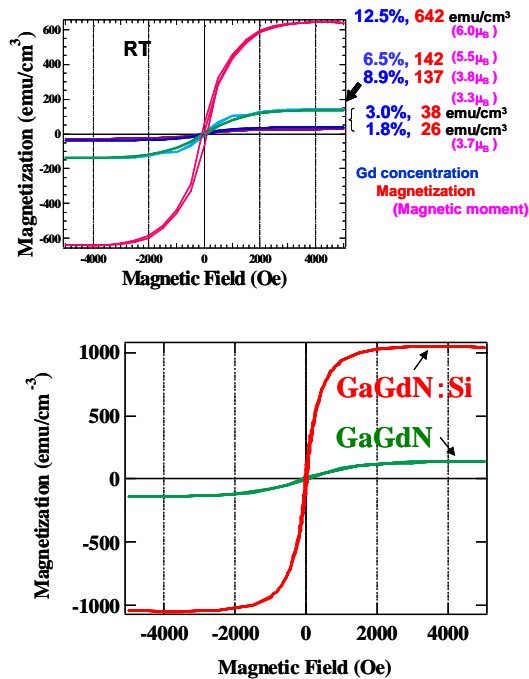


図4 低温成長によるGaGdNのGd濃度および磁化の増大(a)、Siドーピングによる更なる磁化の増大(b)。

(20年度)

(1) 希土類元素Gdを添加したGaGdNナノロッドを、プラズマ励起MBE法によりSiO₂自然酸化膜付きSi(001)基板上に700°Cで成長したGaNナノロッドの上に、Gdフラックスを同時供給することによりやや低い温度の550°Cで成長した。ナノロッドは六方晶かつc軸に配向しており、室温において強磁性特性を示すことが分かった。

(2) 多重量子ディスク(MQDisk)ナノロッド構造は、半導体ナノスピントロニクスデバイスの創製のために基本となる構造である。GaCrN/AlN-MQDisk構造では、Alフラックスを減少させて成長することにより、ヘテロ界面が平坦でAlドロップレットのない良好なGaCrN/AlN-MQDiskが成長可能なことが分かった。

(3) AlNの代わりにAlGaNに置換えたGaCrN/AlGaN-MQW構造とすることによっても平坦なヘテロ界面を持つ良好なMQW構造が成長可能なことが分かった。この知見に基づき、AlGaNGaCrN/AlGaN三層構造磁気トンネルデバイスを試作し、トンネル電流-電圧特性を得た。

5. 発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 18 件)

- (1) H. Tambo, S. Kimura, Y. Yamauchi, Y. Hiromura, S. Emura, S. Hasegawa and H. Asahi, Crystal growth and characterization of GaCrN nanorods on Si substrate, Journal of Crystal Growth (2009)(in press) 査読有
- (2) Y.K. Zhou, S.W. Choi, S. Kimura, S. Emura, S. Hasegawa and H. Asahi, Structural and magnetic properties of GaGdN/GaN superlattice structures, Thin Solid Films (2009)(in press) 査読有
- (3) S. Kimura, S. Emura, K. Tokuda, Y. K. Zhou, S. Hasegawa and H. Asahi, Structural properties of AlCrN, GaCrN and InCrN, J. Crystal Growth, 311(2009) 2046-2048. 査読有
- (4) Y.K. Zhou, S. Kimura, S. Emura, S. Hasegawa and H. Asahi, Formation of aligned CrN nanoclusters in Cr-delta-doped GaN, J. Phys.: Condens. Matter., 21 (2009) 064216-1 – 064216-4. 査読有
- (5) S. Kimura, S. Emura, K. Tokuda, Y. Hiromura, S. Hayakawa, Y.K. Zhou, S. Hasegawa and H. Asahi, Growth and characterization of InCrN and (In,Ga,Cr)N, Phys. Stat. Sol. (c), 5 (2008) 1532-1535. 査読有
- (6) G. S. Song, M. Kobayashi, J. I. Hwang, T. Kataoka, M. Takizawa, A. Fujimori, T. Ohkouchi, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, F.-H. Chang, L. Lee, H.-J. Lin, D. J. Huang, C. T. Chen, S. Kimura, M. Funakoshi, S. Hasegawa, and H. Asahi, Electronic structure of Ga_{1-x}Cr_xN and Si-doping effects studied by photoemission and X-ray absorption spectroscopy, Phys. Rev. B, 78 (2008) 033304-1– 033304-4. 査読有
- (7) Y.K. Zhou, S.W. Choi, S. Emura, S. Hasegawa and H. Asahi, Large magnetization in high Gd concentration GaGdN and Si-doped GaGdN grown at low temperatures, Appl. Phys. Lett. 92 (2008) 6062505-1 – 6062505-3. 査読有
- (8) S. Kimura, S. Emura, Y. Yamauchi, Y. K. Zhou, S. Hasegawa and H. Asahi, Low temperature molecular-beam epitaxy growth of cubic GaCrN, J. Cryst. Growth 310 (2008) 40-46. 査読有
- (9) S. Kimura, S. Emura, H. Ofuchi, Y. Nakata, Y.K. Zhou, C.W. Choi, Y. Yamauchi, S. Hasegawa and H. Asahi, Cr atom alignment in Cr-delta-doped GaN, American Institute of Physics CP, 882 (2007) 410-412. 査読有
- (10) S. Kimura, S. Emura, H. Ofuchi, Y.K. Zhou, S. Hasegawa and H. Asahi, Growth and Characterization of Ferromagnetic Cubic GaCrN: Structural and magnetic properties, J.

- Cryst. Growth 301-302 (2007) 651-655. 査読有
- (11) S. Kobayashi, S. Shanthi, S. Kimura, Y.K. Zhou, S. Emura, S. Hasegawa and H. Asahi, Molecular-beam epitaxy growth and characterization of ferromagnetic cubic GaCrN on GaAs substrate, J. Cryst. Growth 308 (2007) 58-62. 査読有
- (12) M.S. Kim, Y.K. Zhou, M. Funakoshi, S. Emura, S. Hasegawa and H. Asahi, Tunnel magnetoresistance in GaCrN/AlN/GaCrN ferromagnetic semiconductor tunnel junctions, Appl. Phys. Lett. 89 (2006) 232511-1 – 232511-3. 査読有
- (13) M. Hashimoto, S. Emura, H. Tanaka, T. Honma, N. Umesaki, S. Hasegawa and H. Asahi, Local crystal structure and local electronic structure around Cr in low-temperature-grown GaCrN layers, J. Appl. Phys., 100 (2006) 103907-1 - 103907-6. 査読有
- (14) S.W. Choi, Y. K. Zhou, M. S. Kim, S. Kimura, S. Emura, S. Hasegawa and H. Asahi, Ferromagnetism in short-period GaGdN/GaN superlattices grown by RF-MBE, Phys. Stat. Sol. (a) 203 (2006) 2774-2777. 査読有
- (15) S. Shanthi, S. Kimura, M.S. Kim, S. Kobayashi, Y.K. Zhou, H. Hasegawa and H. Asahi, Nature of deep level defects in GaCrN diluted magnetic semiconductor, Jpn. J. Appl. Phys. 45 (4B) (2006) 3522-3525. 査読有
- (16) S. W. Choi, Y. K. Zhou, S. Emura, N. Teraguchi, A. Suzuki and H. Asahi, Magnetic, optical and electrical properties of GaN and AlN doped with rare-earth element Gd, Phys. Stat. Sol. (c) 3 (2006) 2250-2253. 査読有
- (17) S. Kimura, S. Shanthi, Y.K. Zhou, M.S. Kim, S. Kobayashi, S. Emura, S. Hasegawa and H. Asahi, Ferromagnetic cubic GaCrN epitaxial growth over MgO substrate – effect of growth condition, Jpn. J. Appl. Phys. 45 (1A) (2006) 76-78. 査読有
- (18) S.W. Choi, S. Emura, S. Kimura, M.S. Kim, Y.K. Zhou, N. Teraguchi, A. Suzuki, A. Yanase, and H. Asahi, Emission spectra from AlN and GaN doped with rare earth elements, J. Alloys and Compounds, 408-412 (2006) 717-720. 査読有
- [学会発表] (計 19 件)
- (1) S. Emura, M. Takahashi, H. Tambo, T. Nakamura, Y.K. Zhou, S. Hasegawa and H. Asahi, Ferromagnetism and Luminescence of Diluted Magnetic Semiconductors GaGdN and AlGdN, 2008 Materials Research Society Fall Meeting 【招待講演】 2008年12月2日, ボストン (米国)
- (2) H. Asahi, S. Hasegawa, S. Emura and Y.K. Zhou, Growth and characterization of transition-metal and rare-earth doped III-nitride based magnetic semiconductors for nano-spintronics, 4th Handai Nanoscience and Nanotechnology International Symposium 【招待講演】 2008年10月1日, 大阪
- (3) H. Tambo, S. Kimura, Y. Yamauchi, Y. Hiromura, S. Emura, S. Hasegawa and H. Asahi, Crystal growth and characterization of GaCrN nanorods on Si substrate, The 2nd International Symposium on Growth of III-Nitrides, 2008年10月1日, 伊豆
- (4) M. Takahashi, Y.K. Zhou, S. Emura, T. Nakamura, S. Hasegawa and H. Asahi, Magnetic properties of GaGdN studied by SQUID and SX-MCD, 5th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Semiconductors, 2008年8月5日, Foz do Iguacu (ブラジル)
- (5) Y. K. Zhou, M. Takahashi, S. Emura, S. Hasegawa and H. Asahi, Annealing effect in GaDyN on optical and magnetic properties, 5th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Semiconductors, 2008年8月4日, Foz do Iguacu (ブラジル)
- (6) S. Kimura, K. Tokuda, Y. K. Zhou, S. Emura, S. Hasegawa and H. Asahi, Structural properties of AlCrN, GaCrN and InCrN, 15th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, 2008年8月4日, バンクーバー (カナダ)
- (7) M. Takahashi, Y. Hiromura, S. Emura, T. Nakamura Y.K. Zhou, S. Hasegawa and H. Asahi, Third magnetic phase of GaGdN detected by SX-MCD, 29th International Conference on Physics of Semiconductors, 2008年7月29日, リオデジャネイロ (ブラジル)
- (8) S. Emura, S. Kimura, K. Tokuda, Y.K. Zhou, S. Hasegawa and H. Asahi, Orbital ordering on dilute Cr³⁺ ions doped in GaN, 29th International Conference on Physics of Semiconductors, 2008年7月29日, リオデジャネイロ (ブラジル)
- (9) Y.K. Zhou, S. Kimura, S. Emura, S. Hasegawa and H. Asahi, Formation of aligned CrN nano-clusters in Cr-delta-doped GaN, International Conference on Quantum Simulators and Design 2008, 2008年6月1日, 東京
- (10) S. Kimura, S. Emura, Y. Hiromura, Y.K. Zhou, S. Hasegawa and H. Asahi, Growth and characterization of InCrN and (In,Ga,Cr)N diluted magnetic semiconductors, 7th International Conference on Nitride Semiconductors, 2007年9月19日, ラスベガス (米国)

- (11) Y.K. Zhou, S.W. Choi, S. Kimura, S. Emura, S. Hasegawa and H. Asahi, High Gd concentration GaGdN grown at low temperature, SpinTech-IV, June 20-22, 2007年6月21日, ハワイ (米国)
- (12) H. Asahi, Y.K. Zhou, S. Emura and S. Hasegawa, MBE Growth and Characterization of Rare-Earth Doped Nitride Semiconductors for Spintronics, E-MRS2007【招待講演】2007年5月29日, ストラスブルグ (フランス)
- (13) Y.K. Zhou, S.W. Choi, S. Kimura, S. Emura, S. Hasegawa and H. Asahi, Evolution of Cr-doped and Gd-doped GaN layers grown at low temperatures, IUMRS International Conference in Asia 2006【最優秀論文賞】2006年9月12日, チェジュ島 (韓国)
- (14) S.W. Choi, Y.K. Zhou, S. Kimura, S. Emura, S. Hasegawa and H. Asahi, Magnetic properties of Gd-doped GaN single layer and GaGdN short period superlattices grown by RF-MBE, IUMRS International Conference in Asia 2006, 2006年9月12日, チェジュ島 (韓国)
- (15) S. Emura, S. Kimura, M. Hashimoto, S. Kobayashi, S.W. Choi, M.S. Kim, Y.K. Zhou and H. Asahi, Electronic structure of ferromagnetic element Cr in DMS GaCrN observed in X-ray absorption spectra, IUMRS International Conference in Asia 2006, 2006年9月11日, チェジュ島 (韓国)
- (16) S. Kimura, S. Kabayashi, Y.K. Zhou, S. Choi, S. Subashcandran, H. Ofuchi, M. Ishimaru, Y. Hirotsu, S. Emura, S. Hasegawa and H. Asahi, Growth and Characterization of Ferromagnetic Cubic GaCrN, 14th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, 2006年9月4日, 東京
- (17) S. Emura, S.W. Choi, J.J. Kim, S. Kimura, S. Kobayashi, Y.K. Zhou, K. Kobayashi, H. Asahi, N. Teraguchi and A. Suzuki, Electronic State and Local Structure Analysis of GaGdN by HX-PES and XAFS, International Conference on Physics and Applications of Spin Related Phenomena in Semiconductors, 2006年8月17日, 仙台
- (18) S. W. Choi, Y. K. Zhou, S. Kimura, S. Emura, S. Hasegawa, and H. Asahi, Magnetic properties of GaGdN/GaN superlattices grown by RF-MBE, International Conference on Physics and Applications of Spin Related Phenomena in Semiconductors, 2006年8月17日, 仙台
- (19) S. Kimura, S. Emura, H. Ofuchi, Y. Nakata, Y.K. Zhou, C.W. Choi, Y. Yamauchi, S. Hasegawa and H. Asahi, Cr atom alignment in Cr-delta-doped GaN, The XIII International Conference on XAFS, 2006年7月13日, ス

タンフォード (米国)

〔図書〕 (計1件)

- (1) 朝日一, オーム社, 薄膜ハンドブック, (2008)10-14.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計2件)

- (1) 名称: 磁性制御方法
 発明者: 江村修一, 朝日一, 周逸凱
 権利者: 大阪大学
 種類: 特許
 番号: 特願2006-319153
 出願年月日: 2006. 11. 27
 国内外の別: 国内
- (2) 名称: 強磁性材料
 発明者: 周逸凱, 朝日一
 権利者: 大阪大学
 番号: 特願2006-294577
 出願年月日: 2006. 10. 30
 国内外の別: 国内

〔その他〕

<http://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/pem/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

朝日 一 (ASAHI HAJIME)
 大阪大学・産業科学研究所・教授
 研究者番号: 90192947

(2) 研究分担者

長谷川 繁彦 (HASEGAWA SHIGEHICO)
 大阪大学・産業科学研究所・准教授
 研究者番号: 50189528
 江村 修一 (EMURA SHUICHI)
 大阪大学・産業科学研究所・助教
 研究者番号: 90127192
 周 逸凱 (ZHOU IKAI)
 大阪大学・産業科学研究所・助教
 研究者番号: 60346179

(3) 連携研究者

該当なし